

УДК 681.518.3.621.371

# ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В НАЗЕМНЫХ ГИБРИДНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

**Д.В. Хаблов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: [dkhablov@ipu.ru](mailto:dkhablov@ipu.ru)

**Ключевые слова:** автономная навигация, СВЧ, эффект Доплера, взаимная корреляция, радиолокация, квадратурный смеситель.

**Аннотация:** Для работы автоматизированных систем управления в наземном транспорте требуется надежное, точное и непрерывное позиционирование во всей назначенной зоне действия. К сожалению, глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС или GNSS) не может обеспечивать полностью эти критерии, особенно при работе в помещениях и в условиях плохого приема сигналов от спутников. Это приводит к необходимости использования дополнительных локальных или автономных систем навигации, данные от которых используются совместно с ГНСС в т. н. гибридных системах навигации. В докладе исследуется перспективная система автономного наземного позиционирования радиолокационного типа в диапазоне СВЧ радиоволн миллиметрового диапазона, построенная по аналогии с доплеровским датчиком скорости и угла сноса (ДИСС). Приводятся алгоритмы обработки сигналов СВЧ датчиков для получения точных и непрерывных навигационных данных.

## 1. Введение

Определение местоположения в ГНСС достигается путем получения сигнала с помощью TOA-измерения (время прихода сигнала) минимально от четырех спутников GPS (GLONASS, GALILEO и др.). Вычисление координат производится за счет решения системы из четырех уравнений с четырьмя неизвестными. На точность позиционирования влияют следующие ошибки, это ионосферные и тропосферные задержки, ошибки эфемерид, многолучевое распространение радиоволн, доплеровский сдвиг частот для объектов в движении, шумы приемника и др. Имеет значение также и селективная доступность, т.е. искусственное загроушение. Если его не принимать во внимание, то общее среднеквадратичное отклонение GNSS на основе глобальных систем позиционирования типа GPS будет примерно соответствовать 6,6м [1]. Кроме этого часто сигналы от спутников могут не охватывать некоторые зоны из-за особого характера местности (горы, лес), не говоря уже о помещениях и тоннелях, что в целом делает глобальную навигацию недостаточно надежной. Использование GNSS позволяет достичь точности и надежности вполне достаточной для большинства гражданских приложений (для автомобилей, навигации судов и летательных аппаратов в открытом пространстве). Для требований профессиональных служб, безопасности и жизненно важных приложений, например для проведения судов в гавань или посадки самолета, а также для

навигации в закрытых помещениях, где на точность позиционирования воздействует ослабление сигнала при его прохождении через стены и многолучевое распространение, необходим более высокий порядок точности и надежности данных.

Эти задачи решает вторая группа т.н. региональные навигационные системы. Уменьшение ошибки позиционирования в них обеспечивается наличием дополнительной информации о поправках, которые будут применяться при решении уравнений позиционирования. Это может достигаться, например, за счет дополнительной базовой станции расположенной рядом с пользователем, подобно дифференциальной GPS (DGPS). Используются для поправок также спутниковые дополнительные системы (SBAS), системы с кинематикой в реальном времени интерференционного типа (RTK), а также вспомогательные GNSS (AGNSS), где терминал пользователя соединен с сотовой сетью, которая передает уточняющие сообщения о позиции и времени конкретного сотового телефона. В отдельных случаях они позволяют достичь субметрового точности, но в основном это используется для осуществления непрерывности позиционирования.

Для закрытых помещений используются локальные системы позиционирования сотового типа, на беспроводных сетях (WLAN), сенсорных (WSN), с использованием радиочастотных меток (RFID) и сверхширокополосная система (UWB). Расстояния в них вычисляются по мощности принимаемого сигнала (RSS), точность зависит от количества узлов. Для этих систем требуется дорогостоящая инфраструктура, поэтому они применяются сугубо локально для выполнения специфических задач.

В качестве универсальной вспомогательной системы позиционирования для ГНСС наиболее часто используется инерционная система навигации (INS). Она не требует для себя никакой внешней инфраструктуры и поэтому может считаться полностью автономной. Три ортогональных акселерометра, жестко закрепленных на объекте, измеряют ускорение, которое на него действует по predetermined направлениям. Первое интегрирование дает оценку мгновенной скорости, при условии, что начальная скорость была правильно установлена. Второе интегрирование дает расстояние, пройденное объектом в predetermined расстоянии. Гироскопы измеряют скорости вращения (угловую скорость), которое датчик совершает вокруг predetermined оси. В результате, угловая ориентация может быть вычислена путем интегрирования измерений угловой скорости при условии, что задана начальная ориентация оси датчика по отношению к опорной оси. Датчики INS подвержены ошибкам из-за дрейфа оценки во времени. Причиной является то, что координаты положения тела и скорость получаются, соответственно после двойного и одинарного интегрирования измерения с погрешностью. При наземном применении, на показания INS будет влиять не только сопротивление воздуха, аэродинамика транспортного средства (ТС), но и силы трения, связанные с его массой, состоянием дорожного покрытия, давления в шинах и т.д. В среднем эти системы обеспечивают точность до 1% от пройденного пути и 5% от угла, при этом в результате накопительного эффекта, ошибки в определении траектории потенциально неограниченны, поэтому они могут быть использованы лишь на ограниченном отрезке времени. Цель гибридации INS с GNSS, – воспользоваться взаимодополняющими характеристиками двух систем, т.е. повышение их эффективности в тех условиях, когда система работать не может (в городе, в лесу, в помещениях и т.д.) или будет работать с низкой точностью.

Кроме INS, полностью автономной можно считать также и радиолокационную навигационную систему, до сих пор применяемую лишь в авиации (ДИСС), которая обладает определенными преимуществами перед ней по стоимости и точности.

## 2. Применение доплеровских СВЧ датчиков в навигации

Инерционная система, как было отмечено выше, перемещение определяет через двойное интегрирование ускорения, поэтому кроме эффекта накопления ошибки точность будет зависеть от многих параметров. Кроме того, специфика применения в наземном транспорте (НТ), в отличие от воздушного добавляет новые факторы, влияющие на точность. Среди них это силы трения, сцепление с поверхностью, сопротивление воздуха, эффективная площадь и вес объекта, смещение центра тяжести, тряска, большой диапазон и быстрота изменений скорости и ускорений. Это затрудняет использование INS в автомобилях в качестве автономного дополнения к глобальной системе навигации. В тоже время, применяемая в ДИСС радиолокационная система для измерения вектора скорости и угла сноса, позволяющая корректировать данные INS в определенных условиях, не может использоваться в неизменном виде в наземном варианте из-за отсутствия одной из степеней свободы в пространстве.

Радиолокационная система навигации основана на использовании эффекта Доплера для радиоволн [2]. Обычно в простейшем случае используется непрерывное излучение радиоволн СВЧ диапазона. Две антенны из одной точки впереди или с двух сторон НТ излучают вперед и под углами  $\alpha$  к направлению движения в вертикальной плоскости и под углами  $\beta$  по разную сторону от его оси в горизонтальной плоскости, электромагнитные волны с частотой  $f_0$ . Отраженные от поверхности дороги электромагнитные волны принимаются этими же антеннами. Затем они смешиваются в смесителе с частью излучаемых волн, в результате чего выделяются два доплеровских сигнала с частотами  $f_{D1}$  и  $f_{D2}$  для левой и правой сторон. Эти частоты пропорциональны скоростям  $V_1$  и  $V_2$  взаимного перемещения  $S_1$  и  $S_2$  между антеннами и центрами следов от диаграмм направленности антенн на поверхности (рис. 1а, б):

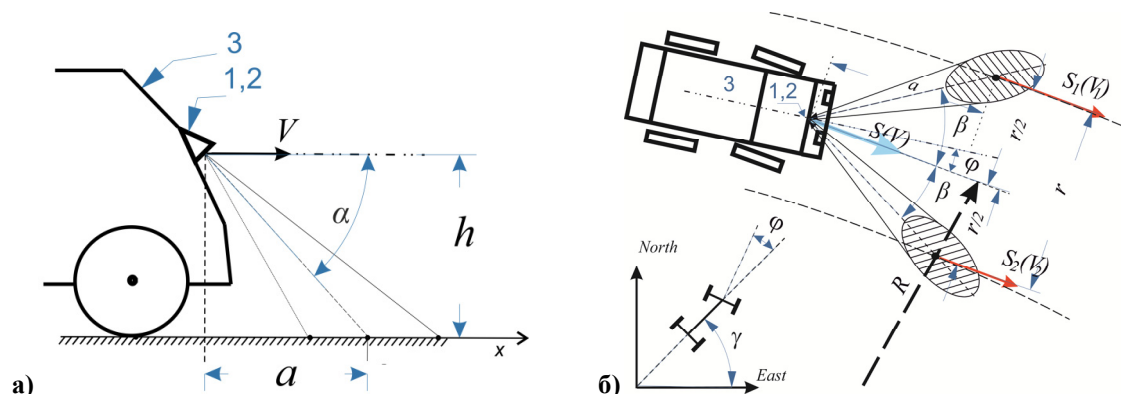


Рис. 1. Расположение антенн доплеровских датчиков 1 и 2 на наземном транспорте 3.: а) вид сбоку; б) вид сверху.

$$(1) \quad f_{D1} = 2V_1 \cos(\alpha) \cos(\beta) / \lambda_0 \quad \text{и} \quad f_{D2} = 2V_2 \cos(\alpha) \cos(\beta) / \lambda_0,$$

где  $\lambda_0 = c/f_0$  – длина волны электромагнитных колебаний,  $c$  – скорость света. Отсюда из формул (1) соответственно можно определить обе скорости:

$$(2) \quad V_1 = \lambda_0 f_{D1} / 2 \cos(\alpha) \cos(\beta) \quad \text{и} \quad V_2 = \lambda_0 f_{D2} / 2 \cos(\alpha) \cos(\beta).$$

На рис. 1б показана фаза  $\varphi$  поворота НТ за небольшой отрезок времени  $\Delta t$  относительно предыдущего направления (угол  $\gamma$ ). Оба центра следов от диаграмм направленности антенн в этот момент времени совершают движение по дугам с радиусами  $R + r$  и  $R - r$ , если расстояние между ними  $r$ , а центр автомобиля движется по радиусу  $R$ . В результате преобразований из (1) и (2) можно получить выражение для векторной скоро-

сти перемещения автомобиля за каждый дискретный момент времени  $\Delta t$  в виде модуля  $V$  и угла  $\varphi$  [3]:

$$(3) \quad \begin{aligned} V &= \lambda_0 (f_{D1} + f_{D2}) / 4 \cos(\alpha) \cos(\beta) \\ \varphi &= \lambda_0 (f_{D1} - f_{D2}) / 4\pi r \cos(\alpha) \cos(\beta) \end{aligned}$$

где  $V = (V_1 + V_2) / 2$ . Весь маршрут можно разбить на дискретные отрезки  $\Delta t_i$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots, N$ , где  $N$  – общее число таких отрезков. Для описания характера движения в этом случае можно использовать двумерный массив этих значений  $\{V_i, \varphi_i\}$ . Движение на каждом временном отрезке  $\Delta t_i$  происходит по окружности с радиусом  $R_i$ , и автомобиль перемещается из точки  $i$  в  $i+1$  по хорде  $L_i$ , которые определяются из формул [3]:

$$(4) \quad R_i = r(f_{D1i} + f_{D2i}) / 2(f_{D1i} - f_{D2i}) \text{ и } L_i = 2R_i \sin(\varphi_i), \quad r = 2h \operatorname{ctg}(\alpha) \operatorname{tg}(\beta).$$

В результате из (3) и (4) получаем выражения для маршрута движения:

$$(5) \quad \begin{aligned} x_{ni} &= L_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin(2\varphi_1 + \varphi_2) + \dots + L_{i-1} \sin(2\varphi_1 + 2\varphi_2 + \dots + \varphi_{i-1}) \\ x_{ei} &= L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos(2\varphi_1 + \varphi_2) + \dots + L_{i-1} \cos(2\varphi_1 + 2\varphi_2 + \dots + \varphi_{i-1}) \end{aligned}$$

### 3. Алгоритмы вычисления мгновенной скорости и перемещения доплеровскими СВЧ датчиками

Таким образом, для определения маршрута  $[x_n, x_e]$  надо точно измерить значения мгновенных доплеровских частот, и произвести их интегрирование по времени. В [3] предложен алгоритм с применением квадратурного смесителя в приемном тракте. Затем полученный аналитический сигнал  $I(t)$  и  $Q(t)$  подобно преобразованию Гильберта обрабатывается с помощью корреляционной процедуры с вычислением текущего времени задержки  $t_z$ , после чего вычисляется мгновенная доплеровская частота и скорость (2). Процедура иллюстрируется на Рис. 2. Здесь видно, что, несмотря на частотную и амплитудную неравномерность сигнала, удается отследить именно мгновенное значение скорости.

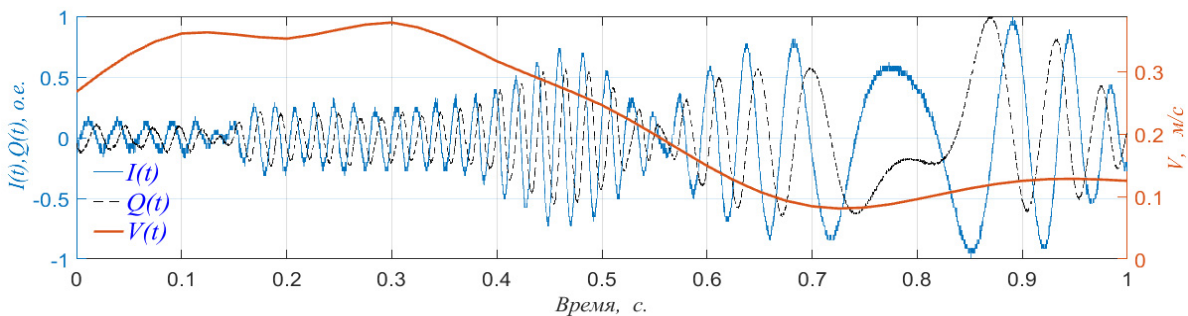


Рис. 2. Вычисление мгновенной скорости  $V(t)$  по доплеровским частотам  $I(t)$  и  $Q(t)$  СВЧ датчика.

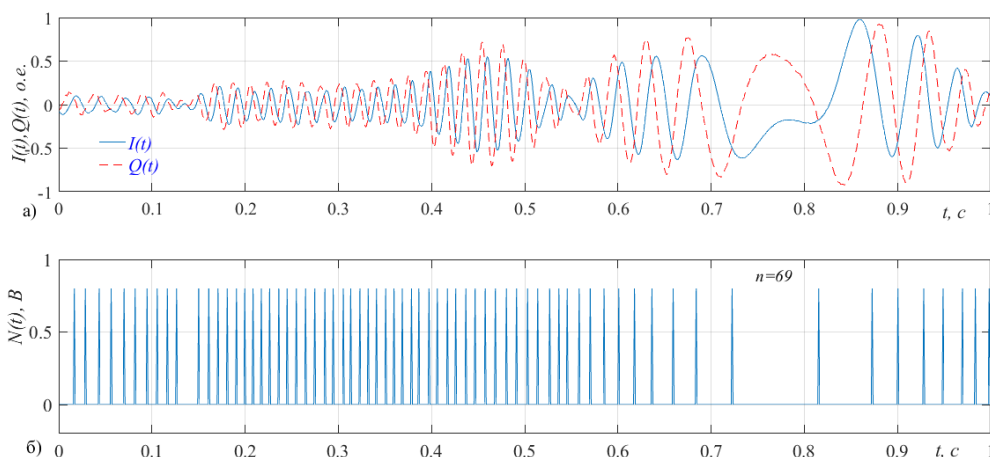
Поскольку процесс вычисления занимает некоторое время, а последующее интегрирование может привести еще и к эффекту накопления ошибки, есть смысл в переходе к прямому измерению вектора перемещения с некоторой фиксированной ошибкой дискретности. Благодаря этому можно повысить точность и быстродействие измерения.

В упомянутой схеме с квадратурными смесителями вычисления перемещений можно произвести с помощью числа пересечений этих сигналов. Этот процесс иллюстрируется на Рис.3. В этом случае перемещения следов от диаграмм направленности вы-

числяются по числу  $N_{1i} N_{2i}$  пересечений сигналов  $I_{1,2}(t)$  и  $Q_{1,2}(t)$  с использованием лишь компаратора и счетчика.

$$S_{1i} = \frac{\lambda_0 N_{1i}}{4 \cos(\alpha) \cos(\beta)} \text{ и } S_{2i} = \frac{\lambda_0 N_{2i}}{4 \cos(\alpha) \cos(\beta)},$$

$$L_i = r \left( \frac{S_{1i} + S_{2i}}{S_{1i} - S_{2i}} \right) \sin \left( \frac{(S_{1i} - S_{2i}) 90^\circ}{\pi r} \right), \quad \varphi_i = \frac{(S_{1i} - S_{2i}) 90^\circ}{\pi r}.$$



**Рис. 3.** Прямое вычисление перемещения а) доплеровские сигналы  $I_{1,2}(t)$  и  $Q_{1,2}(t)$ ; импульсы.

Это существенно ускоряет процесс измерения, гарантируя высокую непрерывность измерения со следующей погрешностью, пропорциональной полуволне СВЧ излучения:

$$\delta S = \pm \frac{\lambda_0}{4 \cos(\alpha) \cos(\beta)}.$$

## 4. Заключение

Представленный метод позиционирования наземных транспортных средств является полностью автономным и может использоваться в качестве дополнительного к ГНСС в составе гибридной схемы взаимодействия или без неё в качестве основного к IMS в промышленных зданиях или тоннелях, где исключается проникновение сигналов от спутников. СВЧ позиционирование дает более точные и надежные данные, обладает быстрым действием, достаточным для обеспечения непрерывности измерений в гибридных системах, устраняет эффект накопления ошибки за счет прямого измерения вектора перемещения на плоскости. Показания не зависят от массы объекта, сил сопротивления, трения, скольжения, вибрации и тряски. Устройство работает бесконтактно, в нем нет механических элементов, что обеспечивает высокую надежность. Благодаря всем этим качествам система может быть использована в качестве дополнительной для локальных систем навигации или как основная, если зона эксплуатации не имеет соответствующей инфраструктуры.

## Список литературы

1. Дардари Д., Фаллети Э., Луизе М. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012.

2. Виктор В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
3. Хаблов Д.В. Autonomous navigation system of ground transport based on Doppler sensors for measuring vector velocity // Measurement Techniques. 2018. Vol. 61, No. 4. С. 384-389.